

## « Coup de pouce 2012 »

# Mesure de champs de déformation 3D par corrélation d'images volumiques obtenues par laminographie synchrotron lors de la rupture ductile

Thilo MORGENEYER, Centre des Matériaux, Mines ParisTech  
François HILD, LMT-Cachan, ENS Cachan

### Exposé scientifique du projet :

Une meilleure compréhension de la déformation des matériaux et plus particulièrement des tôles minces au cours de la rupture ductile peut permettre une meilleure modélisation et prévision de la rupture des matériaux et une optimisation de la microstructure. Le lien entre la déformation et l'endommagement pour les matériaux ductiles à un taux de triaxialité bas est toujours mal compris [1]. Jusqu'à présent, des mesures cinématiques en surface ont été menées par corrélation d'images [2]. Des calculs 3D par éléments finis sont également conduits afin de mieux comprendre les phénomènes de déformation. Cependant, des mesures 3D à l'intérieur des matériaux ne sont que très rarement faites.

Le développement récent de la technique de laminographie aux rayons X (au synchrotron) permet d'observer en 3 dimensions des objets qui sont fins ( $\sim 1$  mm d'épaisseur) mais étendus dans un plan. Cela permet des observations *in-situ* de la rupture ductile dans des tôles gardant des conditions aux limites similaires aux applications en service ce qui est un grand avantage par rapport à la tomographie. L'évolution de l'endommagement d'un alliage d'aluminium pour une application sur fuselage a ainsi pu être observée récemment à une résolution micrométrique (figure 1) [3].

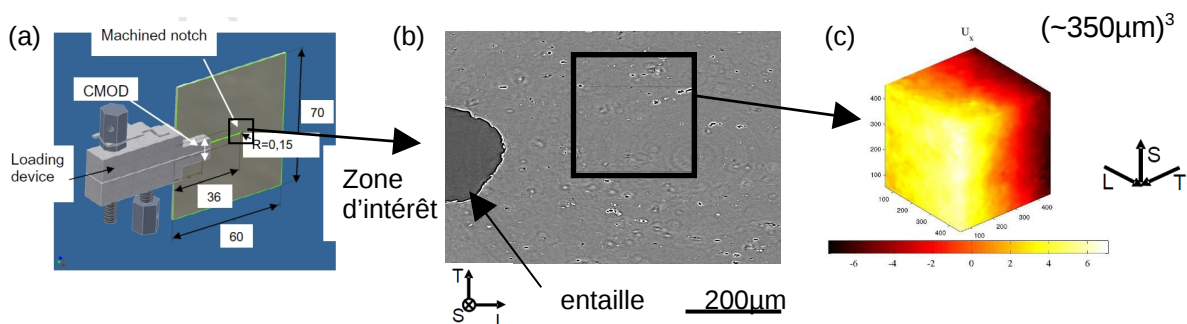


Figure 1. a) Dispositif de chargement *in-situ* et éprouvette [3] b) Sections 2D de données laminographiques (3D) au centre d'une éprouvette entaillée (zone d'intérêt) avec la région d'intérêt pour la CIV c) Champ de déplacement 3D entre 2 pas de chargement, la barre de couleurs indique les déplacements dans le sens du chargement (sens T) exprimés en voxels (1 voxel = 0.7  $\mu$ m) [4].

L'approche originale de ce projet est la tentative de mesurer des champs de déplacement, d'en déduire des champs de déformations 3D en combinant les observations de laminographie synchrotron de la microstructure et la corrélation d'images volumiques (CIV) [5]. Cette mesure peut être possible grâce au contraste naturel de la microstructure (porosités préexistantes ainsi qu'aux phases lourdes à base de fer) [4].

Le caractère exploratoire du projet est d'identifier tout d'abord la faisabilité de la mesure de champ de déplacements avec cette combinaison de techniques. Pour cela une étude systématique d'incertitudes devra être menée avant de pouvoir commencer à déterminer des champs de déformations. Le risque est que l'incertitude de mesure générée par la reconstruction de la technique de laminographie et/ou la distribution des phases visibles dans le matériau (très faible fraction volumique) soit élevée. Ceci rendrait le lien

entre la déformation et l'endommagement plus difficile, voire impossible sans avoir recours à des techniques régularisées par la mécanique [6].

Le but final de cette étude est d'analyser des champs de déformation devant une entaille dans un alliage d'aluminium pour application aéronautique au cours de l'amorçage et de la propagation d'une fissure ductile. Les mécanismes de localisation de déformations seront reliés aux mécanismes d'endommagement. Plus particulièrement, la transition d'une fissure plane en fissure en biseau sera étudiée en analysant les champs de déformation et l'endommagement en 3D. Au total, des séries de scans laminographiques *in-situ* pour 3 alliages d'aluminium différents avec des microstructures / contrastes distincts sont déjà disponibles à ce jour pour la corrélation / l'analyse de la faisabilité de mesure ainsi que pour une étude du rôle des phases et de la plasticité (taux d'écroutissage) sur la rupture.

Ces observations et mesures seront comparées à des calculs par éléments finis utilisant différents modèles développés dans les deux laboratoires et de nouvelles approches pourront être développées en fonction des résultats des mesures et des premiers calculs.

**Compétences mises en commun :** Le projet sera effectué en liant l'aspect observation de matériaux et microstructures au Centre des Matériaux (Mines ParisTech) et la mesure des champs de déplacement et de déformation par corrélation d'images 3D au LMT (ENS Cachan). Une comparaison des résultats mesurés aux calculs éléments finis 3D est envisagée pendant le projet. Différents modèles développés dans les deux laboratoires pourront être utilisés. Il est également envisagé d'utiliser les mesures CIV pour fournir les conditions aux limites de calculs EF en 3D.

**Moyens demandés :** Les données de laminographie *in-situ* concernant l'amorçage et la propagation de fissure ductile avec 20 pas de chargement ont déjà été acquises pour l'alliage 2139 [3]. Des données *in-situ* similaires, mais pour des alliages d'aluminium donnant un contraste de microstructure différent et ayant des écroutissages différents, sont également disponibles. Le logiciel de corrélation d'images volumique est validé [5]. Pour l'étude de faisabilité et de mesure 3D on demande des moyens en ressources humaines. Un étudiant en Master MAGIS (Thibault TAILLANDIER-THOMAS) effectue actuellement son stage entre les deux laboratoires et a déjà commencé à travailler sur le sujet de cette proposition. On souhaite garder l'étudiant en thèse et on demande une aide au co-financement d'une thèse (50k€).

**Suites potentielles :** Suite au succès de l'étude de faisabilité de mesure un projet ANR pourra être déposé. Une demande temps de faisceau synchrotron ESRF sera également faite.

### **Références bibliographiques**

- [1] Zerbst U., Heinemann M., Dalle Donne C., Steglich D., "Fracture and damage mechanics modelling of thin-walled structures – An overview". *Engineering Fracture Mechanics* 76 (2009), 5-43.
- [2] Sutton M.A., McNeill S.R., Helm J.D., Chao Y.J., "Advances in Two-Dimensional and Three-Dimensional Computer Vision", in: P.K. Rastogi (Ed.) *Photomechanics*, Springer, Berlin (Germany), pages 323-372, 2000.
- [3] Morgeneyer T.F., Helfen L., Sinclair I., Proudhon H., Xu F., Baumbach T., "Ductile crack initiation and propagation assessed via *in situ* synchrotron radiation computed laminography". *Scripta Materialia*, 65 (2011) 1010-1013.
- [4] Morgeneyer T.F., Helfen L., Sinclair I., Hild F., Proudhon H., Xu F., Baumbach T., "In-situ synchrotron-radiation computed laminography observation of ductile fracture". *Proceedings of the SEM conference 2011, Optical Measurements, Modeling, and Metrology*, 5, (2011), 19-25.
- [5] Roux S., Hild F., Viot P., Bernard D., "Three dimensional image correlation from X-Ray computed tomography of solid foam". *Composites Part A/Applied Science & Manufacturing*. 39 (2008) 1253-1265.
- [6] Leclerc H., Périé J.N., Roux S., Hild F., "Voxel-scale digital volume correlation", *Experimental Mechanics*, 51 (2011) 479-490.